第46卷 第6期
2023年6月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

基于RSEI和ANN-CA-Markov模型的伊宁市生态环境质量动态监测及预测研究

陈勉为[1,2]， 冯 丹[1,2]， 张仕凯[1,2]， 江 雨[1,2]， 张新兰[1,2]

（1. 伊犁师范大学化学与环境科学学院，新疆 伊宁 835000；2. 伊犁师范大学污染物化学与环境治理重点实验室，新疆 伊宁 835000）

摘 要： 伊宁市位于中国新疆西北边陲伊犁河谷内，土地肥沃，水资源和生物资源丰富，具有发展农、林、牧业的优越自然条件，但由于城市化进程过快，导致生态遭受破坏，生态环境质量不断下降，因此依托遥感生态指数(Remote-sensing ecological index，RSEI)及ANN-CA-Markov模型，科学、合理地利用Landsat TM5/OLI-TIRS8遥感数据对开展伊宁市2006—2021年生态环境动态评价及预测具有重要意义。结果表明：(1) 绿度和湿度对伊宁市生态水平具有正面影响，干度和热度对伊宁市生态水平具有负面影响，影响伊宁市生态环境质量的主要因素依次为绿度、热度、干度、湿度，符合伊犁河谷地区所表现出来的生态状况。(2) 伊宁市RSEI平均值为0.451，总体处于中等水平，生态环境质量变化呈现两极逐渐缩小的趋势，但RSEI指标中等区域及较差区域的面积正在逐年增大，总体生态环境呈现稳中向差的发展趋势。(3) 预计2026年和2031年伊宁市北坡地区生态得到一定程度改善，结合《新疆伊宁市城市2018—2035年总体规划》，城区在未来生态环境质量依旧保持在中等水平，城市将继续向外扩张，可耕地面积将继续减少。

关 键 词： 遥感生态指数；Landsat卫星；生态环境质量预测；ANN-CA-Markov模型；伊宁市

文章编号： 1000－6060(2023)06－0911－11(0911～0921)

生态环境质量是人类活动和生态环境共同作用的结果，自然环境与人类生存和社会经济发展息息相关，随着社会的发展和科技的进步，人类物质文明的发展达到了前所未有的高度，但是伴随而来的是日益严峻的生态环境问题[1]。人类过度地攫取自然资源，盲目追求经济利益，经济的发展与资源配置的矛盾日益突出，给人类自身的生存和发展带来了严重的威胁，这使得世界各国日渐关注生态环境问题[2]。1992年“可持续发展”的观念在巴西举行的联合国发展与环境会议上提出，人类清晰地意识到在追求经济发展的同时要保护生态环境，实现可持续发展是全世界面临的艰巨任务。

从世界范围来看，我国的生态环境问题更加严峻。我国的经济在快速发展，但在发展的过程中，过度消耗自然资源，由此引发了一系列生态环境问题。土地退化、水土流失、空气污染等一系列问题是中国面临的主要环境问题[3]。人们对生态环境问题越来越关注，生态环境的好坏直接影响区域的可持续发展，如何用科学的方法定量评价生态环境就显得格外重要。目前，已知并可行的研究方法多种多样，卫星遥感以其大范围监测、周期性、实时性等优点，在区域生态环境评价中得到了广泛的应用。然而，目前的大多数研究仅基于单一指标来描述生态环境的特定方面，基于遥感影像热红外波段反演地表温度监测城市热岛[4]；或者构建各种干旱指数来评估区域干旱状况[5]。然而，由于生态系统的复

收稿日期： 2022-09-07； **修订日期：** 2022-10-18
基金项目： 伊犁师范大学校级一般项目(2022YSYB018)；新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2021D01C461)资助
作者简介： 陈勉为(1995-)，男，讲师，主要从事生态环境遥感监测技术等方面的研究. E-mail: mianweichen@163.com
通讯作者： 冯丹(1984-)，女，教授，主要从事污染物防治与生态修复等方面的研究. E-mail: 282625430@qq.com

杂性，单一的指标往往无法全面有效地描述生态环境。同时，有学者利用层次分析法和压力-状态-响应(PSR)模型对多个指标进行构建，从而对生态环境进行评价[6]，但这些指标通常面临着权重难以确定、人为主观性强等问题。自徐涵秋[7]首次提出使用遥感生态指数(Remote-sensing ecological index, RSEI)来表征生态环境质量，该指数利用主成分分析将4个生态指标耦合起来，该指标获取简单、无需人工确定权重等优点，目前多名学者已证明RSEI的可靠性。Cui等[8]以生态环境质量指数为基础分析了2000—2020年淮北市生态环境的变化情况，并且得出2000—2010年，城市建设对各类土地的侵占，是导致生态环境质量下降的直接原因；Zhang等[9]以乌鲁木齐市为研究对象，结果表明近25 a来，乌鲁木齐市RSEI均值逐渐下降，生态环境总体恶化，但各区县之间的差异依然显著；王瑾杰等[10]以吐鲁番市和哈密市为研究对象，建立和绘制吐哈地区多个时期的RSEI模型，并对此地区的生态环境质量及土地利用进行了定量分析，研究表明2000—2018年吐哈地区的生态环境质量表现为略微下降的趋势；农兰萍等[11]基于RSEI模型对昆明市生态环境质量的动态监测，研究结果表明2000—2018年，昆明市RSEI的平均值为0.51，生态环境质量呈现"上升-下降-上升-下降"的波动变化趋势。目前为止，主要是针对研究区域RSEI的动态评价[12]，但对RSEI的预测目前仅有王丽霞等[13]通过耦合CA-Markov模型对研究区域进行生态环境预测，传统的CA-Markov模型具有较强的主观性，对于生态环境变化这类复杂问题的模拟，其准确性并不高，但人工神经网络(Artificial neural network, ANN)具有模拟复杂非线性问题的能力，因此本研究在CA-Markov模型的基础上构建ANN-CA-Markov模型，将4个生态指标作为驱动力因子，并结合RSEI对生态环境质量进行更科学合理地预测。

本文以新疆伊犁州伊宁市作为研究区域，伊宁市作为伊犁河谷城市，先后荣获"中国优秀旅游城市""国家园林城市"、国家新型城镇化综合试点市等称号，土地资源、矿产资源、畜牧业资源、林业资源极其丰富。因此科学、合理地对伊宁市生态环境质量变化进行动态监测及合理预测研究，不仅能够探索伊宁市生态环境质量变化的时空分布特征，分析影响因素，还能够为伊宁市生态空间的优化管控与未来的可持续发展和决策提供适合建议，以保证国土空间的生态安全。本研究对于伊宁市生态环境质量动态监测及预测具有重大意义，为可持续发展战略和生态保护规划改善伊宁市生态环境质量提供参考和科学依据。

1 研究区概况

伊宁市位于中国新疆西北边陲，地处伊犁河谷盆地中央，地理位置介于43°50′~44°09′N、80°04′~81°29′E之间，东连伊宁县，西邻霍城县，南濒伊犁河与察布查尔锡伯自治县隔河相望(图1)。伊宁市土地肥沃，水、热资源和生物资源丰富，具有发展农、林、牧业的优越自然条件。辖区总面积674.42 km²，2019年底常住人口总计5.827×10⁵人，伊宁市属于北温带大陆性气候，年平均气温16 ℃，年平均降水量275.5 mm，生态资源丰富，植物种类繁多。

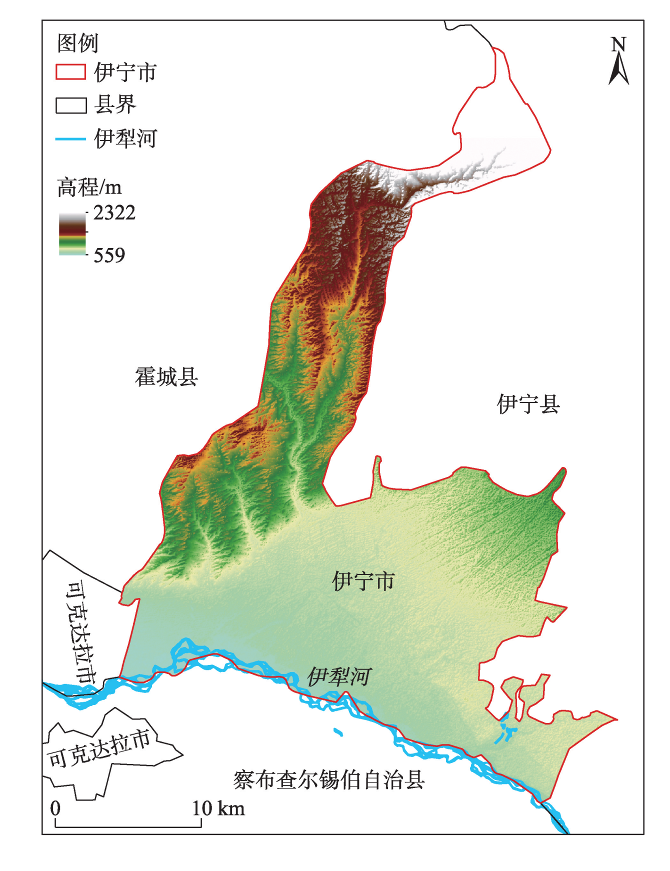


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

研究中使用的数据来自美国地质调查局(USGS)的Landsat TM5和Landsat OLI-TIRS8,数据参数见表1。遥感影像空间分辨率为30 m,空间投影坐标系为WGS_1984_UTM_Zone_44N,其中Landsat5 TM宽幅为185×185 km²,Landsat OLI/TIRS8宽幅为170×180 km²。研究区所用的矢量数据涉及伊宁市各县域行政边界,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)。

表1 2006—2021年4期遥感影像部分参数

Tab. 1 Part parameters of four remote sensing images from 2006 to 2021

序号	传感器类型	日期(年-月-日)	云量/%
1	Landsat TM5	2006-09-06	1.00
2	Landsat TM5	2011-09-20	2.00
3	Landsat OLI-TIRS8	2016-09-01	0.40
4	Landsat OLI-TIRS8	2021-09-15	0.75

在提取构建RSEI前,原始图像需经过ENVI 5.3进行预处理,包括几何校正、辐射定标、大气校正和图像裁剪,预处理结果进行假彩色合成(由Near IR、Red、Green三波段合成)(图2)。

2.2 遥感生态指数

本次研究中,RSEI采用主成分分析法,先将绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDSI)及热度(TEM)通过模型分别计算;为减少误差,筛选4个指标的数据处于5%~95%的置信区,并进行归一化处理,将归一化处理的数据通过波段合成,4个指标归一化后的数据集中到第一主成分上,根据4个指标在主成分上的贡献率和自身性质来确定权重值,可减少人为赋值误差,各指标模型如下。

2.2.1 绿度(植被指数) 植被指数(NDVI)由Rouse等[14]提出,并已成为遥感中最广泛使用的植被指数,用于监测地表绿色植被覆盖,本文中使用此指标来表征RSEI中的绿度。公式如下:

$$NDVI=(\rho_{NIR}-\rho_{red})/(\rho_{NIR}+\rho_{red}) \tag{1}$$

式中:ρ_{NIR}为近红外波段;ρ_{red}为红波段。波长参数见表2。

2.2.2 湿度(湿分指数) 湿分指数(WET)可通过缨帽变换(也称K-T变换)计算得出,从Landsat图像数据中提取参数,本文使用此指标来表征RSEI中的湿度,但由于Landsat TM5和Landsat OLI8传感器参数不同,因此对于湿分量模型参数有所不同[15-16]。公式如下:

$$\begin{aligned}WET_{TM}=&\rho_{blue}\times0.0315+\rho_{green}\times0.2021+\\&\rho_{red}\times0.3102+\rho_{NIR}\times0.1594-\\&\rho_{SWIR1}\times0.6806-\rho_{SWIR2}\times0.6109\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}WET_{OIL}=&\rho_{blue}\times0.1511+\rho_{green}\times0.1973+\\&\rho_{red}\times0.3283+\rho_{NIR}\times0.3407-\\&\rho_{SWIR1}\times0.7117-\rho_{SWIR2}\times0.4559\end{aligned} \tag{3}$$

式中:ρ_{blue}为蓝波段;ρ_{green}为绿波段;ρ_{SWIR1}为短波红外1;ρ_{SWIR2}为短波红外2。波长参数见表2。

2.2.3 干度(建筑-裸土指数) 建筑-裸土指数(NDSI)可用于有效监测环境干度,通过对建筑指数(IBI)和裸土指数(SI)两者的平均值进行计算[17-18],以此指标来表征RSEI中的干度。公式如下:

$$IBI=\frac{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR}}-\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{red}}-\frac{\rho_{green}}{\rho_{green}+\rho_{SWIR1}}}{\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR}}+\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR}+\rho_{red}}+\frac{\rho_{green}}{\rho_{green}+\rho_{SWIR1}}} \tag{4}$$

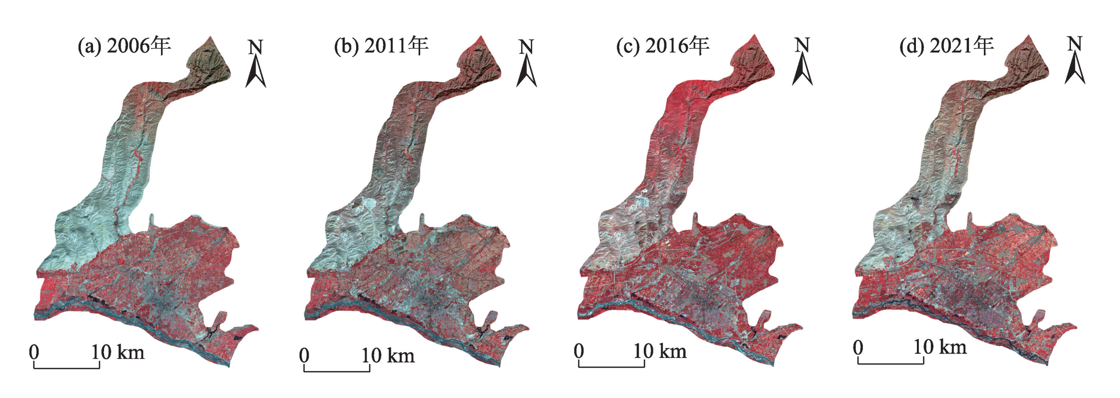


图2 2006—2021年预处理假彩色合成图像

Fig. 2 Pretreatment of false color composite images from 2006 to 2021

$$\mathrm{SI}=\frac{\left(\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{red}}\right)-\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{blue}}\right)}{\left(\rho_{\mathrm{SWIR1}}+\rho_{\mathrm{red}}\right)+\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{blue}}\right)} \quad (5)$$

$$\mathrm{NDSI}=\frac{\mathrm{IBI}+\mathrm{SI}}{2} \quad (6)$$

2.2.4 热度(陆地表面温度) 陆地表面温度(TEM)使用大气矫正法对Landsat图像数据进行地表温度反演,通过利用植被覆盖度(Fractional vegetation cover,FVC)计算得到地物发射率(Ref),原始的遥感影像像元亮度值[B(Ts)]经过辐射校正后,得到星上辐射亮度值,星上辐射亮度值经过大气校正,去除水汽的影响后,得到辐射亮度值,然后将辐射亮度值转化为相对于黑体的黑体辐射亮度值,通过Plank函数的转化,将黑体辐射亮度值转化为黑体亮度温度值,即为地表温度[19-22]。公式如下:

$$\mathrm{FVC}=\mathrm{NDVI}_{<0.05}\times 0+\mathrm{NDVI}_{>0.7}\times 1+\mathrm{NDVI}_{0.05\sim0.7}\times\frac{\mathrm{NDVI}_{0.05\sim0.7}-0.05}{0.7-0.05} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}E_{(\mathrm{water})}&=0.995\\E_{(\mathrm{building})}&=0.9589+0.086\times\mathrm{FVC}-0.0671\times\mathrm{FVC}^2\\E_{(\mathrm{natural})}&=0.9625+0.0614\times\mathrm{FVC}-0.0461\times\mathrm{FVC}^2\end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathrm{Ref}=\mathrm{NDVI}_{\leqslant 0}\times E_{(\mathrm{water})}+\mathrm{NDVI}_{0\sim0.7}\times E_{(\mathrm{building})}+\mathrm{NDVI}_{\geqslant 0.7}\times E_{(\mathrm{natural})} \quad (9)$$

$$\mathrm{B(Ts)}=\frac{\rho_{\mathrm{TIRS1}}-L_{\mathrm{up}}-t\times(1-\mathrm{Ref})\times L_{\mathrm{down}}}{t\times\mathrm{Ref}} \quad (10)$$

$$\mathrm{TEM}=\frac{\mathrm{K}_2}{\ln\left[\frac{\mathrm{K}_1}{\mathrm{B(Ts)}}+1\right]} \quad (11)$$

式中:$\mathrm{NDVI}_{<0.05}$、$\mathrm{NDVI}_{>0.7}$、$\mathrm{NDVI}_{0.05\sim0.7}$分别为NDVI取值范围;$E_{(\mathrm{water})}$为水体像元比辐射率;$E_{(\mathrm{building})}$为城镇像元比辐射率;$E_{(\mathrm{natural})}$为自然表面比辐射率;$\rho_{\mathrm{TIRS1}}$为热红外1波段;$L_{\mathrm{up}}$为大气向上辐射亮度;$L_{\mathrm{down}}$为大气向下辐射亮度;$t$为大气在热红外波段的透过率($L_{\mathrm{up}}$、$L_{\mathrm{down}}$、$t$的数据通过NASA大气剖面计算器得出http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/);K_1和K_2为卫星发射预设常量(Landsat TM5: K_1=607.76、K_2=1260.56; Landsat OLI-TIRS8: K_1=774.89、K_2=1321.08)。参数见表2。

2.2.5 RSEI模型建立 将上面得到的4个因子指标通过主成分分析(PCA)进行耦合,利用第一个主成分(PC1)构建RSEI,最大的优点是综合指标的权重不是人为确定,而是根据各指标对PC1的贡献度自动客观确定,避免了在计算中因权重设置因人而异、因方法不同而可能导致结果偏差,提高了结果的客观性和可信度。

由于上述4个因子的维度不均匀,如果直接用4个因子来计算PCA,每个指标的权重就会不平衡。因此,在计算PCA之前,应该对上述4个因子进行归一化处理,将每个指标值转换为0~1范围内的无量

表2 Landsat卫星传感器参数

Tab. 2 Landsat satellite sensor parameters

卫星	传感器类型	波段	名称	波长范围/μm	中心波长/μm
Landsat TM5	陆地成像仪TM	ρ_{blue}	蓝波段	0.450~0.520	0.485
		ρ_{green}	绿波段	0.520~0.600	0.560
		ρ_{red}	红波段	0.630~0.690	0.660
		ρ_{NIR}	近红外波段	0.760~0.900	0.830
		ρ_{SWIR1}	短波红外1	1.550~1.750	1.650
		ρ_{SWIR2}	短波红外2	10.400~12.500	11.475
	热红外传感器TIRS	ρ_{TIRS1}	热红外1	2.080~2.350	2.215
Landsat OLI-TIRS8	陆地成像仪OLI	ρ_{coastal}	海岸波段	0.433~0.453	0.443
		ρ_{blue}	蓝波段	0.450~0.515	0.482
		ρ_{green}	绿波段	0.525~0.600	0.562
		ρ_{red}	红波段	0.630~0.680	0.655
		ρ_{NIR}	近红外波段	0.845~0.885	0.865
		ρ_{SWIR1}	短波红外1	1.560~1.660	1.610
		ρ_{SWIR2}	短波红外2	2.100~2.300	2.200
		ρ_{pan}	全色波段	0.500~0.680	0.640
		ρ_{cirrus}	卷云波段	1.360~1.390	1.375
	热红外传感器TIRS	ρ_{TIRS1}	热红外1	10.60~11.19	10.900
		ρ_{TIRS2}	热红外2	11.50~12.51	12.000

纲值[23]。公式如下：

$$XI_i = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (12)$$

式中：XI_i为归一化之后的数值；I_i为归一化前的数值；I_{max}和I_{min}分别为归一化前的最大值和最小值。

4个因子在归一化计算后，借助ENVI 5.3软件中波段合成模块和PCA模块计算PC1，在个别情况下，生态较好区域的值反而越低，对其进行正负值转置，使RSEI值越高的地方表示生态越好。公式如下：

$$RSEI = 1 - [PC1(NDVI, WET, NDSI, TEM)] \quad (13)$$

2.3 预测模型

元胞自动机（Cellular automata，CA）模型是一种具有模拟复杂系统时空演化过程的能力模型[24]，但传统的CA模型具有较强的主观性，因此存在一定的局限性。人工神经网络具有足够模拟复杂非线性问题的能力，拥有较强的并行、分布式存储、处理、自组织、自适应和自学能力，其本质就是通过对样本的不断训练从而获取最小误差的网络参数值，而后通过输入与训练样本相似的数据输出结果误差最小的数据[25]。Markov模型是用来预测事件发生概率的一种方法，在区域土地利用变化中Markov模型有着广泛的应用[26-27]，但由于土地利用的空间分布随机性较强，因此传统模型具有局限性，很难达到预测效果。

通过耦合ANN、CA、Markov模型，以CA作为基础，结合Markov和ANN模型进行构建，成为ANN-CA-Markov模型，此模型普遍适用于土地利用变化的模拟和预测，因生态环境质量也是具有高度空间自相关性的栅格数据，因此研究尝试使用ANN-CA-Markov模型对RSEI进行预测。通过使用中山大学刘小平教授团队开发的GeoSOS-FLUS V2.4软件，完成对研究区域未来的RSEI的预测[28]。运用Kappa系数和FoM指数来确定精度，其中Kappa系数大于75%，认为结果可信度较高，模拟效果较好；FoM指数为灵敏值，一般小于0.1则认为模拟精度较高。

3 结果与分析

3.1 4个指标的主成分分析

伊宁市2006—2021年4个年份RSEI指标主成分分析结果如表3所示。4个年份PC1的贡献率结果分别为85.67%、76.39%、79.67%、82.17%，表明

表3 2006—2021年各指标主成分分析

Tab. 3 Principal component analysis of indicators from 2006 to 2021

年份	分量指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2006	NDVI	0.511	0.675	−0.514	0.138
	WET	0.496	−0.362	0.221	0.758
	NDSI	−0.488	−0.266	−0.726	0.405
	TEM	−0.505	0.585	0.399	0.493
	特征值	0.374	0.027	0.014	0.009
	贡献率/%	85.67	6.66	5.19	2.48
2011	NDVI	0.531	0.781	−0.372	0.180
	WET	0.468	−0.348	0.288	0.716
	NDSI	−0.482	−0.155	−0.665	0.550
	TEM	−0.515	0.496	0.581	0.390
	特征值	0.246	0.034	0.027	0.015
	贡献率/%	76.39	10.60	8.35	4.66
2016	NDVI	0.524	0.512	−0.582	0.386
	WET	0.464	0.660	0.229	0.536
	NDSI	−0.474	−0.309	−0.732	0.739
	TEM	−0.507	0.480	0.267	0.131
	特征值	0.258	0.032	0.029	0.004
	贡献率/%	79.67	10.00	9.02	1.31
2021	NDVI	0.515	0.810	−0.270	0.268
	WET	0.447	−0.392	0.349	0.677
	NDSI	−0.496	−0.130	−0.602	0.613
	TEM	−0.508	0.417	0.665	0.307
	特征值	0.297	0.037	0.020	0.008
	贡献率/%	82.17	10.14	5.61	2.08

注：NDVI为绿度；WET为湿度；NDSI为干度；TEM为热度；PC1~PC4分别为第一主成分至第四主成分。

PC1集中了4个指标的大部分特征，可以用来表示研究区域的整体生态情况。其中绿度和湿度的特征值均为正值，说明绿度和湿度对伊宁市生态水平具有正面影响；干度和热度的特征值均为负值，说明干度和热度对伊宁市生态水平具有负面影响。此外对比4个年份4个指标的特征绝对值发现，4个指标排序为绿度>热度>干度>湿度，说明影响伊宁市生态环境质量的主要因素依次为绿度、热度、干度、湿度，符合伊犁河谷地区所表现出来的生态状况[29]。

3.2 伊宁市生态环境质量的时空变化分析

通过Excel将4个指标数据及RSEI统计并绘制折线图（图3）。根据我国生态环境部发布的《生态环境状况评价技术规范（HJ 192—2015）》对生态环境状况进行分级，以0.2作为分级标准，即好（0.8~

1.0)、较好(0.6~0.8)、中等(0.4~0.6)、较差(0.2~0.4)、差(0.0~0.2)。

由图3根据时间变换分析可知，2006—2021年伊宁市4个年份RSEI指标平均值为0.451，表明其生态环境质量总体处于中等水平。2006—2021年RSEI从0.427上升到0.484，上升了13.34%，呈现上升趋势，表明伊宁市生态环境质量整体有所改善，其中2011—2016年期间涨幅达11.28%，上升较为明显，主要得益于伊宁市北坡荒漠草原开展生态修复的原因[30]；但2016—2021年由于伊宁市开发区城市化进程加快，土地利用的转变，导致RSEI出现小幅度下降。4个指标中绿度、干度、热度变化幅度趋于平稳；由于伊宁市处于伊犁河谷内，且自1999年开始，降水呈持续增长趋势[31]，因此湿度增幅较为明显。

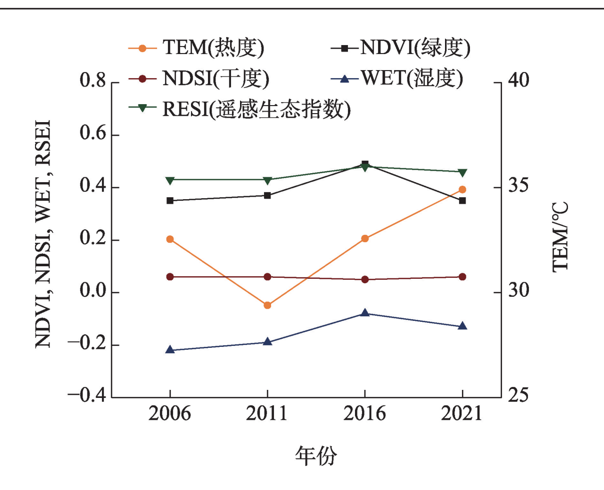


图3 2006—2021年分量指标和RSEI的统计值

Fig. 3 Statistical values of sub indicators and RSEI from 2006 to 2021

根据上述RSEI分级标准，利用ArcGIS 10.5软件对伊宁市各年的RSEI进行重分类处理，得到2006—2021年伊宁市生态环境质量图(图4)。由图4分析可知，2006—2021年伊宁市北部山区生态环境质量处于较差或中等水平，主要由于伊宁市北部依靠天山山脉，辖区内北山坡面积近1.3×10^4 hm^2，绝大部分属于半荒漠化草场，属于生态脆弱区，总体发展处于稳定水平，其中2011—2016年生态呈现变好趋势，但后期出现反弹；南部伊犁河城区生态环境质量基本处于中等、较好水平，主要因为濒临伊犁河，水热资源丰富，为南部奠定了优良的生态环境基础；中部城区有明显地向外扩张趋势，较2006年相比，西部开发区及东城区生态质量呈下降趋势，其中2016年城区生态呈现较差状态，但随后开展绿化及建造公园等市政工程[32]，2021年城区生态环境得到改善，恢复至中等水平。

通过ArcGIS和Excel将2006—2021年4期RSEI各等级面积进行提取并计算(表4)。由表4可看出2006—2021年伊宁市生态环境质量等级为好的区域面积减少了9.27 km^2，占总面积1.37%，保持相对稳定；较好区域面积减少31.47 km^2，占总面积4.67%；中等区域的面积保持相对稳定，面积增加4.06 km^2，占比0.60%；较差区域面积变化较为显著，2006—2021年面积增长49.59 km^2，占总面积7.35%，应尽快采取修复措施；差的区域面积减少12.92 km^2，占总面积1.92%，其中2011年下降较为明显，但随后呈上升趋势，主要由于2011年后城市不断向外扩张，土地利用类型转变。综上所述伊宁市生态环境质量变化呈现两极正在逐渐缩小的趋势，但中等区域及较差区域的面积正在逐年增大，总体生态环境呈现稳中趋差的方向发展，需加大生态修复力度。

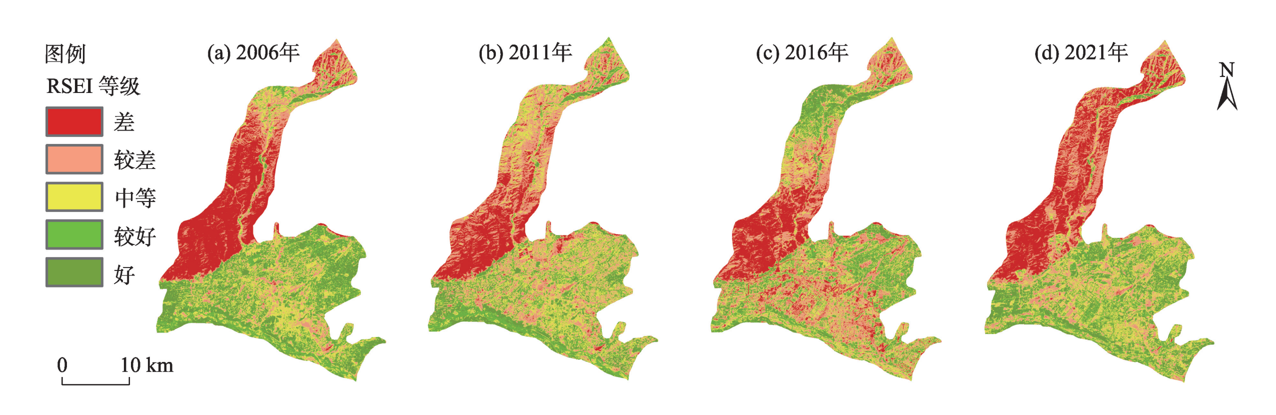


图4 2006—2021年伊宁市RSEI等级分布

Fig. 4 Distributions of RSEI in Yining City from 2006 to 2021

表4　2006—2021年伊宁市各生态等级面积与占比

Tab. 4　Area and proportion of different ecological grades in Yining City from 2006 to 2021

年份	差		较差		中等		较好		好	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
2006	161.10	23.89	113.32	16.80	161.14	23.89	152.03	22.54	86.84	12.88
2011	102.70	15.23	196.86	29.19	196.37	29.12	122.17	18.12	56.32	8.35
2016	126.63	18.78	203.17	30.13	162.34	24.07	125.77	18.65	56.51	8.38
2021	148.18	21.97	162.91	24.16	165.20	24.50	120.56	17.88	77.57	11.50

3.3　伊宁市生态环境质量的时空变化差异分析

在上述RSEI等级划分的基础上，为得到不同年份之间生态环境质量变化的时空分布信息，利用差值处理不同年份的RSEI。将变化情况分为3类变好(>0)、不变(=0)和变差(<0)，其中按照变化的程度将变好与变差分为4级，分别为±4、±3、±2和±1，统计结果见表5，并通过ArcGIS 10.5绘图，结果见图5。

由表5及图5分析得出，根据时间变化分析得出，2006—2011年生态环境质量的面积变化：变好的面积180.49 km²、不变的面积共315.53 km²、变差的面积178.40 km²，分别占总面积的26.76%、46.78%、26.45%，北部山坡地区生态环境质量逐年改善。2011—2016年生态环境质量的面积变化：变好的面积177.66 km²、不变的面积共268.45 km²、变差的面积228.30 km²，分别占总面积的26.34%、39.80%、33.85%。2016—2021年生态环境质量的面积变化：变好的面积243.80 km²、不变的面积共247.89 km²、变差的面积182.73 km²，分别占总面积的36.15%、36.76%、27.09%，伊宁市生态环境质量向差的趋势发展。2006—2021年生态环境质量的面积变化：变好的面积159.14 km²、不变的面积共312.99 km²、变差的面积202.30 km²，分别占总面积的23.60%、46.41%、30.00%。总体上，伊宁市的生态环境质量状况较稳定，但整体环境质量依然不容乐观，如不及时开展生态修复，未来生态环境将会进一步变差。

3.4　RSEI预测

首先通过GeoSOS-FLUS V2.4软件利用Markov和ANN模型分别以2011年和2016年伊宁市RSEI分类数据为依据，将NDVI、WET、NDSI、TEM作为驱动力因子，确定转换规则，获得2021年模拟预测，将2021年模拟预测结果与实际2021年遥感生态指数分类图进行比较。通过模拟与真实数据进行比较，具有较高精度，Kappa系数为0.815，FoM指数为0.04，证明模拟数据具有一定的准确性，结果可靠。因此通过2021年为基准，依此模型预测2026年及2031年伊宁市RSEI(图6)。

通过图6分析，可看出2026年和2031年伊宁市北坡地区生态得到一定程度改善，但由于伊宁市西部生态差地区靠近伊犁图开沙漠，生态改善存在困

表5　2006—2021年伊宁市生态质量变化情况

Tab. 5　Changes of ecological quality in Yining City from 2006 to 2021　　/km²

生态质量变化等级		面积			
		2006—2011年	2011—2016年	2016—2021年	2006—2021年
变差	−4	1.16	2.36	4.67	0.30
	−3	16.52	9.23	22.45	9.43
	−2	49.95	43.58	43.27	50.55
	−1	110.77	173.13	112.34	142.02
不变	0	315.53	268.45	247.89	312.99
变好	+1	156.18	118.97	181.61	125.06
	+2	22.42	48.40	50.72	28.74
	+3	1.33	9.72	9.93	5.10
	+4	0.56	0.57	1.54	0.24

注：“+”代表生态水平的提高；“−”代表生态等级的恶化。

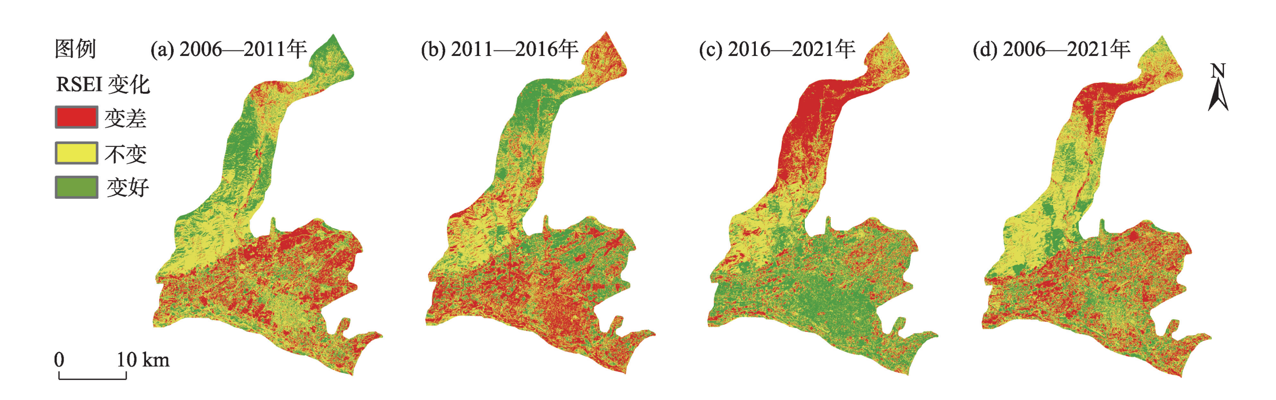


图5 2006—2021年伊宁市RSEI时空变化

Fig. 5 Temporal and spatial changes of RSEI in Yining City from 2006 to 2021

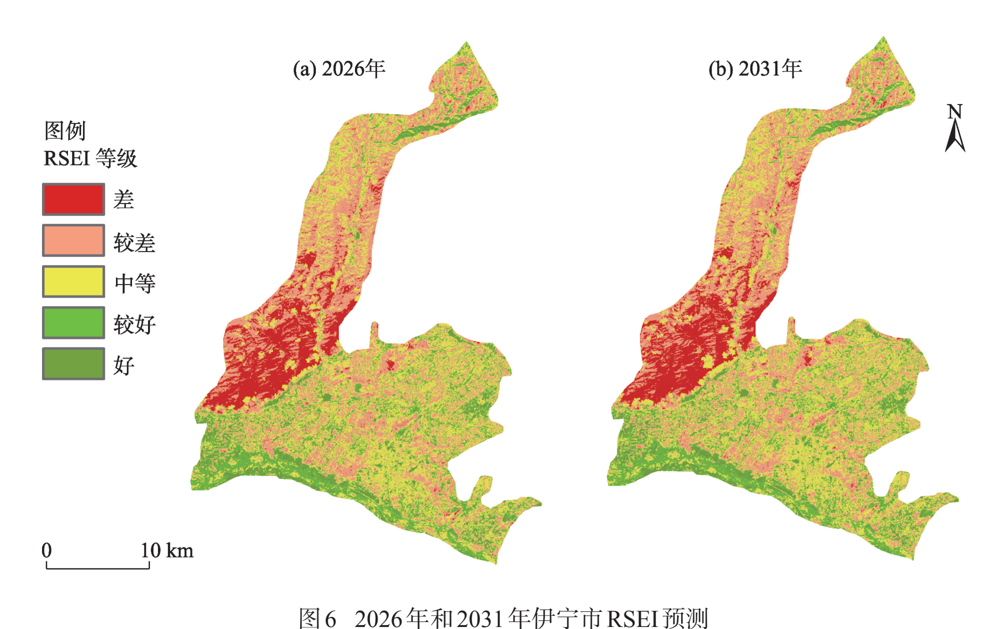


图6 2026年和2031年伊宁市RSEI预测

Fig. 6 Forecast of RSEI in Yining City in 2026 and 2031

难，结合新疆伊宁市城市2018—2035年总体规划，随着未来经济及城市化进程的继续发展，城区在未来生态环境依旧保持在中等水平，但城市将会继续向外扩张，自2000年伊宁市耕地面积286.13 km^2缩减到2018年229.20 km^2[33]，未来耕地面积将持续减少，建议在经济与社会发展的同时，加强区域生态保护。

4 结 论

（1）2006—2021年伊宁市4个年份RSEI指标主成分分析结果表明，绿度和湿度对伊宁市生态水平具有正面影响，干度和热度对伊宁市生态水平具有负面影响，影响伊宁市生态环境质量的主要因素依次为绿度、热度、干度、湿度，符合伊犁河谷地区所表现出来的生态状况。

（2）2006—2021年伊宁市4个年份RSEI指标平均值为0.451，总体处于中等水平。伊宁市北部山区属于半荒漠化草场，属生态脆弱区，生态环境质量处于中下水平；南部濒临伊犁河，水热资源丰富，生态环境质量基本处于中上水平；西部开发区及东城区生态环境质量2016年前呈下降趋势，随后开展绿化及建造公园等对策，恢复至中等水平。伊宁市生态环境质量变化呈现两极正在逐渐缩小的趋势，但中等区域及较差区域的面积正在逐年增大，总体生态环境呈现稳中向差的发展趋势，需加大生态修复力度。

（3）预计2026年和2031年伊宁市北坡地区生态得到一定程度改善，但由于伊宁市西部生态差地区靠近伊犁图开沙漠，生态改善存在困难，结合《新

疆伊宁市城市2018—2035年总体规划》，城区在未来生态环境依旧保持在中等水平，但城市将会继续向外扩张，未来耕地面积将持续减少，建议在经济与社会发展的同时，加强区域生态保护。

综上所述，构建RSEI动态监测评价伊宁市近15 a来的生态质量情况，分析4个影响因素对伊宁市生态环境质量影响机理，明确城市发展过程中的生态空间缺陷，利用CA-Markov模型与ANN人工神经网络相结合，预测伊宁市未来10 a内生态质量情况，预测精度(Kappa系数)可达到0.815，远高于传统预测模型，但目前还不能达到随时随地的动态预测，未来可通过卷积神经网络进行图像的深度学习，通过以往的大量图像数据的学习训练，使人工智能算法的精度达到0.9以上，并可以进行长期准确预测。

参考文献(References)

[1] Zhou J B, Liu W Q. Monitoring and evaluation of eco-environment quality based on remote sensing-based ecological index (RSEI) in Taihu Lake Basin, China[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5642, doi: 10.3390/su14095642.

[2] 陈黎鹏. 玛纳斯河流域生态环境质量评价研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2020. [Chen Lipeng. Study on the ecological environment of Manas River Basin[D]. Shihezi: Shihezi University, 2020.]

[3] 徐凯磊. 基于多源遥感数据的全国生态环境质量时空演变研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018. [Xu Kailei. Study on spatio-temporal evolution of national ecological environment quality based on multi-source remote sensing data[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2018.]

[4] Guo A D, Yang J, Xiao X G, et al. Influences of urban spatial form on urban heat island effects at the community level in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53(C): 101972, doi: 10.1016/j.scs.2019.101972.

[5] Tsakiris G, Vangelis H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration[J]. European Water, 2005(9/10): 1–9.

[6] Hazbavi Z, Sadeghi S H, Gholamalifard M, et al. Watershed health assessment using the pressure-state-response (PSR) framework[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31: 3–19.

[7] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889–897. [Xu Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889–897.]

[8] Cui R H, Han J Z, Hu Z Q, et al. Assessment of spatial temporal changes of ecological environment quality: A case study in Huaibei City, China[J]. Land, 2022, 11(6): 944, doi: 10.3390/LAND11060944.

[9] Zhang J J, Zhou Q, Cao M, et al. Spatiotemporal change of eco-environmental quality in the oasis city and its correlation with urbanization based on RSEI: A case study of Urumqi, China[J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9227, doi: 10.3390/su14159227.

[10] 王瑾杰, 丁建丽, 张子鹏. 基于遥感生态指数的吐哈地区生态环境变化研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1591–1603. [Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zipeng. Change of ecological environment in Turpan and Hami cities based on remote sensing ecology index[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1591–1603.]

[11] 农兰萍, 王金亮. 基于RSEI模型的昆明市生态环境质量动态监测[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 2042–2050. [Nong Lanping, Wang Jinliang. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Kunming based on RSEI model[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6): 2042–2050.]

[12] Zheng Z, Wu Z F, Chen Y B, et al. Instability of remote sensing based ecological index (RSEI) and its improvement for time series analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, 814: 152595, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.152595.

[13] 王丽霞, 赵蕊, 刘招, 等. 基于RSEI的延河流域生态环境质量监测与预估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 943–954. [Wang Lixia, Zhao Rui, Liu Zhao, et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 943–954.]

[14] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[J]. Nasa Special Publication, 1974, 351: 309–317.

[15] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3): 301–306.

[16] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423–431.

[17] Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 4269–4276.

[18] Essa W, Verbeiren B, van der Kwast J, et al. Evaluation of the distrad thermal sharpening methodology for urban areas[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 19: 163–172.

[19] Jimenez-Munoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(1–2): 339–349.

[20] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434–440.

[21] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends[J]. Isprs

Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2009, 64(4): 335-344.

[22] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005, 71(5): 613-621.

[23] Zhang T, Yang R Q, Yang Y, et al. Assessing the urban eco-environmental quality by the remote-sensing ecological index: Application to Tianjin, north China[J]. International Journal of Geo-information, 2021, 10(7): 475, doi: 10.3390/IJGI10070475.

[24] 贾京默, 孙钊, 桂心如, 等. 基于Ann-CA-Markov模型的鹤岗市农林用地景观格局研究[J]. 林业资源管理, 2022(3): 81-88. [Jia Jingmo, Sun Zhao, Gui Xinru, et al. Simulation of landscape pattern of agricultural and forestry land in Hegang City based on Ann-CA-Markov model[J]. Forest Resources Management, 2022(3): 81-88.]

[25] 欧照铿. Markov约束下ANN-CA模型构建与闽侯县土地利用模拟研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014. [Ou Zhaokeng. Study on modeling and simulating of land use based on ANN-CA model under the constraints of Markov in Minhou County[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.]

[26] 赵晓峰, 王金林, 王珊珊, 等. 基于MCR模型的卡拉麦里地区生态安全格局变化研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1396-1406. [Zhao Xiaofeng, Wang Jinlin, Wang Shanshan, et al. Changes of ecological security pattern in Kalamaili region based on MCR models[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1396-1406.]

[27] 靳含, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于CA-Markov模型的多时间跨度土地利用变化模拟[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1415-1426. [Jin Han, Yang Aimin, Xia Xinxin, et al. Simulation of land use change at different time spans based on CA-Markov model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1415-1426.]

[28] 赵林峰, 刘小平, 刘鹏华, 等. 基于地理分区与FLUS模型的城市扩张模拟与预警[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 517-530. [Zhao Linfeng, Liu Xiaoping, Liu Penghua, et al. Urban expansion simulation and early warning based on geospatial partition and FLUS model[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3): 517-530.]

[29] 唐利华, 张永福, 刘小辉. 干旱区河谷城市土地利用生态风险动态预测——以新疆伊宁市为例[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 240-245. [Tang Lihua, Zhang Yongfu, Liu Xiaohui. Dynamic forecast of ecological risk of land use in the arid river valley city: A case study of Yining City in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 240-245.]

[30] 马鹏, 李志忠, 靳建辉, 等. 基于土地利用的新疆伊犁河谷生态系统服务价值评价[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2010, 33(3): 331-335. [Ma Peng, Li Zhizhong, Jin Jianhui, et al. Ecosystem service value evaluation based on land use of Yili Valley in Xinjiang[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2010, 33(3): 331-335.]

[31] 肉孜买买提·阿不来提. 新疆伊宁市1952年—2015年气温及降水量变化特征分析[J]. 陕西水利, 2020, 239(12): 20-22, 25. [Ablait Ruzimamat. Analysis on the characteristics of temperature and precipitation changes in Yining, Xinjiang from 1952 to 2015[J]. Shaanxi Water Resources, 2020, 239(12): 20-22, 25.]

[32] 海晓宇. 新疆伊宁市城市市容环境卫生管理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019. [Hai Xiaoyu. A study on urban sanitation and environmental sanitation management in Yining City, Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019.]

[33] 赵禾苗, 阿里木江·卡斯木. 基于GIS的绿洲城市时空扩展特征研究——以新疆伊宁市为例[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(14): 109-116. [Zhao Hemiao, Kasim Alimujiang. Study on the spatial and temporal expansion characteristics of oasis city based on GIS: Taking Yining City, Xinjiang as an example[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(14): 109-116.]

Dynamic monitoring and prediction of eco-environmental quality in Yining City based on RSEI and ANN-CA-Markov model

CHEN Mianwei[1,2], FENG Dan[1,2], ZHANG Shikai[1,2], JIANG Yu[1,2], ZHANG Xinlan[1,2]

(1. School of Chemistry and Environmental Science, Yili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China; 2. Key Laboratory of Pollutant Chemistry and Environmental Treatment, Yili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China)

Abstract: Yining City, located at the northwest border of Xinjiang in the Ili River Valley, China, has fertile land, abundant water and biological resources, and favorable natural conditions for the development of agriculture, forestry, and animal husbandry. However, due to the rapid urbanization process, the ecology has been damaged, and the quality of the ecological environment has declined. Therefore, it is of great significance to scientifically and reasonably utilize Landsat TM5/OLI-TIRS8 remote sensing data to conduct a dynamic evaluation and prediction of the ecological environment in Yining City from 2006 to 2021 based on the remote-sensing ecological index (RSEI) and ANN-CA-Markov model. The results show that: (1) Greenness and humidity have a positive impact on the ecological level of Yining City, while dryness and heat have a negative impact. The main factors affecting the ecological environment quality of Yining City are, in order, greenness, heat, dryness, and humidity, which are consistent with the ecological conditions exhibited in the Ili River Valley region. (2) The average RSEI indicator of Yining City is 0.451, which is at a moderate level overall. The ecological environment quality change shows a trend of gradually narrowing extremes, but the areas with medium and poor RSEI indices are increasing year by year, and the overall ecological environment presents a stable-to-worse development trend. (3) It is predicted that by 2026 and 2031, the ecological environment in the northern slope region of Yining City will improve to a certain extent. In combination with the overall urban planning of Yining City, Xinjiang, from 2018 to 2035, the ecological environment quality in the urban area will still remain at a medium level in the future, and the city will continue to expand outward, resulting in a continuous reduction in arable land area.

Key words: RSEI; Landsat; eco-environmental quality prediction; ANN-CA-Markov model; Yining City